

碩士學位 論文

기액이상류시의 펌프특성실험에 관한  
기초연구

**A Basic Study on the Pump Characteristics Experiments  
Operating in Air-Water Two-Phase Flow**

지도교수 : 김유탉

2005年

韓國海洋大學交 大學院

機關시스템工學科

金 成 潤

本 論文을 金成潤의 工學碩士 學位論文으로 認准함

主審：工學博士 南 青 都 (印)

副審：工學博士 李 英 浩 (印)

副審：工學博士 金 由 澤 (印)

2005年

韓國海洋大學交 大學院

機關시스템工學科

金 成 潤

# 목 차

제 1 장 서론-----	1
1.1 연구 배경-----	1
1.2 연구 목적-----	3
제 2 장 기액이상류 실험장치의 구축-----	8
2.1 기액이상류 실험장치의 구성-----	8
2.1.1 실험장치의 개요-----	8
2.1.2 임펠러와 케이싱-----	8
2.1.3 측정시스템-----	13
2.2 기액이상류 실험장치의 운전-----	15
2.2.1 실험장치의 기동-----	15
2.2.2 프로그램 조작방법-----	15
제 3 장 기액이상류 실험장치의 재현성 및 신뢰성 검증--	21
3.1 실험 펌프-----	21
3.2 유량계의 검증-----	23
3.2.1 직각 3각 위어로 측정하는 방법-----	23
3.2.2 전자유량계의 원리-----	24
3.2.3 직각3각 위어실험과 전자유량계 실험결과의 비교-----	24
3.3 성능실험 결과의 재현성 및 신뢰성 검증-----	30

제 4 장	단상류시의 원심펌프 특성-----	34
4.1	임펠러 질량의 변화에 따른 특성-----	34
4.2	임펠러 형상에 따른 특성-----	37
제 5 장	기액이상류시의 원심펌프의 특성-----	39
5.1	공기공급장치의 구성-----	39
5.2	임펠러 형상에 따른 기액이상류 특성-----	41
5.3	기액이상류시의 유동패턴-----	46
5.3.1	가시화 실험장치의 구성 및 실험방법-----	46
5.3.2	유로폐쇄시의 유동특성-----	46
제 6 장	결론-----	52
참고문헌	-----	53
Abstract	-----	55
Nomenclature	-----	56
감사의 글	-----	57

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

펌프, 송풍기, 압축기, 수차 등 유체와 기계간의 상호 에너지 변환을 행하는 유체기계는 인간 생활, 산업 활동에 있어서 필요 불가결한 존재이다. 선박에 있어서도 급수펌프, 순환수펌프, 냉각수펌프, 각종 압축기·송풍기 등 중요한 보조기계의 대부분을 차지하고 있다. 유체기계는 사용되는 플랜트에 있어서 유체기계의 정지는 전체 조업의 정지를 의미하는 경우가 많으며 그 때문에 고도의 신뢰성 확보가 매우 중요하다.

유체기계 중에서도 임펠러의翼작용을 이용한 터보기계는 고효율, 간편한 보수관리, 적은 소음 등의 장점이 있어, 그 대부분을 차지하고 있다. 원래 터보기계는 單相流 상태에서 사용되는 것으로서 二相流 상태가 되면 임펠러의 작용이 악화되어 운전이 불가능하게 되는 경우가 많다. 따라서 이상류 상태에서의 사용은 피하도록 고려되어있다. 그러나, 흡입관 접합부의 불량에 의한 공기의 흡입, 보일러의 급수 등과 같이 증기포를 포함하는 경우, 펌프 흡입파이프에 생기는 공기흡입 渦(air entraining vortex)에 의한 공기의 혼입 뿐만 아니라, 유전채굴펌프, 빗물의 배수 등과 같이 흡입 상태가 원래부터 기체와 액체의 이상류가 되는 등의 문제와 관련해서 펌프를 기액이상류 상태에서 작동시킬 필요성이 강하게 부각되었으며, 선박에 있어서도 고성능화·저비용화라는 상반된 요구를 충족하기 위해 소형화·고속화가 추진되면서 펌프의 흡입압력 저하에 의한 공기흡입 및 캐비테이션 발생 가능성의 증가로 인하여 이 방면에서의 연구도 활기를 띠기 시작했다.

그러나, 이러한 터보기계내의 이상류는 직관내 이상류와 비교하여 유속이 빠르고, 압력구배가 크며 유동이 정지계에서 회전계, 다시 정지계로 이동하는 복잡한 좌표계에 관계된다. 또한 코리올리력에 의해 유동과 직각방향에 커다란 힘이 작용하는 등의 회전계 고유의 문제도 있어 직관내 이상류의 성과를 그대로 이용하여도 만족할만한 성과를 얻지 못한다. 이 때문에 많은 연구가 행해지고 있지만 아직 미확립된 이론이 많고 해결되어야 할 많은 문제점을 갖고 있다.

## 1.2 연구 목적

Minemura와 Murakami(1988)는 Fig. 1과 같이 일반적인 horizontal-type의 원심펌프를 대상으로 공기흡입의 영향이 유동에 어떠한 영향을 미치는지를 연구했다<sup>[1]</sup>. 또한 Kaneko와 Ohashi(1981)는 Fig. 2와 같이 Vertical-type의 원심펌프를 대상으로 그 영향을 분석했다<sup>[2]</sup>. 그들은 공기의 흡입으로 인하여 펌프의 성능은 불연속적으로 변한다고 보고한바 있다. 더욱이 일반적인 원심펌프는 보이드율이 5-6% 이상이 되면 펌프의 성능이 급격히 감소한다고 보고하고 있다<sup>[3]</sup>(Furukawa et al., 1977). 또한 Fig. 3과 같이 Kim(1999)은 Screw-type 원심펌프를 대상<sup>[4]</sup>으로 임펠러 간극 및 보이드율, Fig. 4(a), (b)와 같이 케이싱 유로의 압력측정, 유동패턴 등을 통하여 양수불능의 특성을 분석하였다<sup>[5][6][7]</sup>. 그러나 이러한 연구들은 이상류 상태에서 펌프의 성능에 관한 연구가 대부분이며 펌프성능이 저하되는 손실부분을 정량화 하지 못하여 원인을 명확히 규명하는데 어려움이 있다. 이상류 상태에서의 펌프성능이 저하되는 원인을 정량화하기 위해서는 임펠러 간극, 보이드율, 케이싱내의 유동패턴, 유속, 압력구배, 기포경 등 다양한 변수가 단상류, 이상류시 펌프특성에 정성적·정량적으로 어떠한 영향을 미치는지 파악하여야 한다. 본 논문에서는 우선적으로 기액이상류 실험장치를 구축하여 실험장비의 신뢰성을 검증하고, 펌프의 성능이 저하되는 손실부분을 정량화하기 위한 기초 자료를 확보하고자 임펠러 형상 및 질량을 변수로 단상류시의 펌프의 특성을 파악하였으며, 이상류시 보이드율을 변수로 펌프의 특성을 파악하였다.

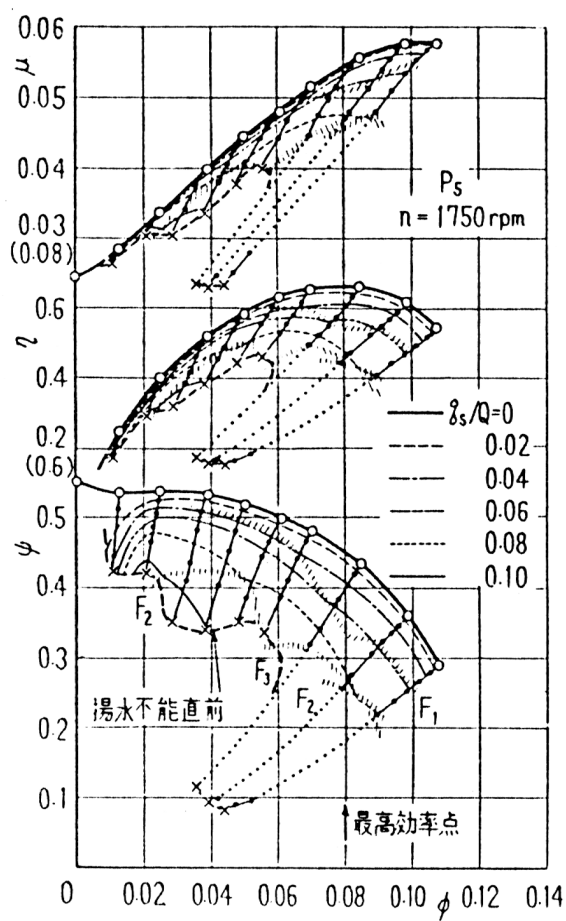


Fig. 1 Characteristics of horizontal-type centrifugal pump in air-water two-phase flow according to void fraction<sup>[1]</sup>



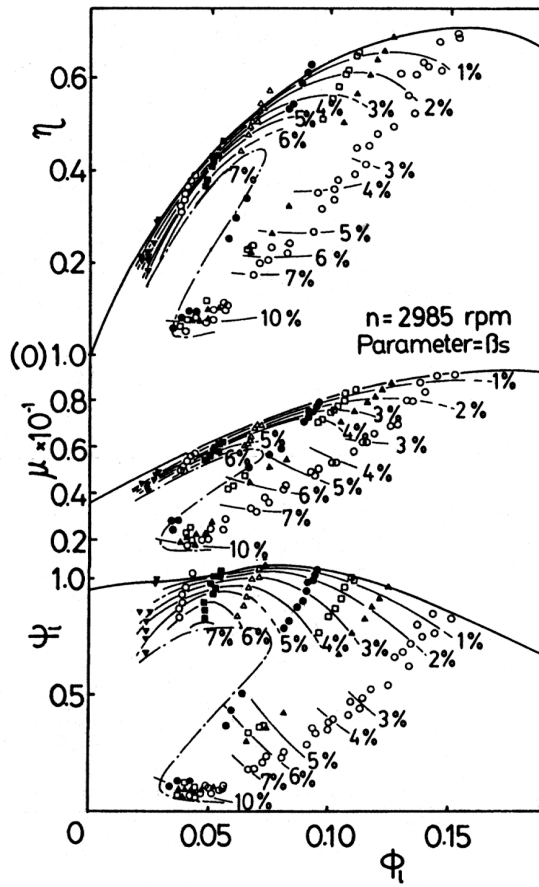


Fig. 2 Characteristics of vertical-type centrifugal pump in air-water two-phase flow according to void fraction<sup>[2]</sup>

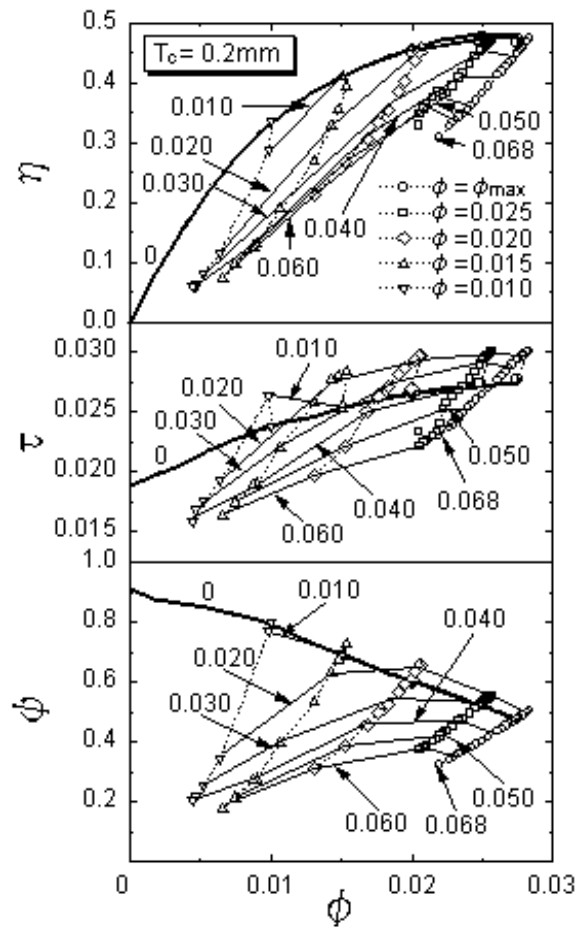
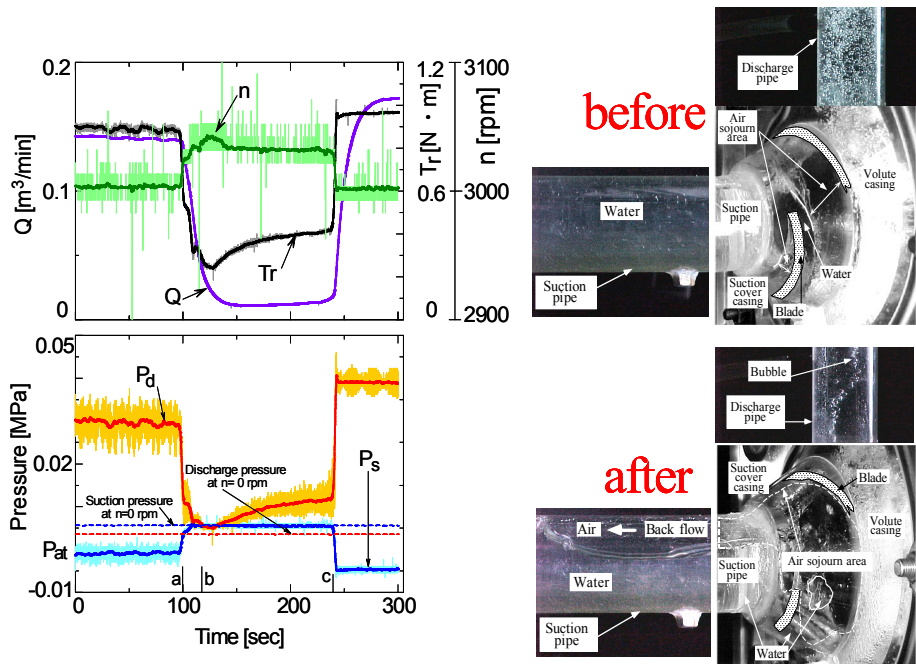


Fig. 3 Characteristics of screw-type centrifugal pump in air-water two-phase flow according to void fraction and tip clearance<sup>[4]</sup>



(a) pump characteristics

(b) visualization

Fig. 4 Pump characteristics and visualization of screw-type centrifugal pump  
(before and after break down)<sup>[5]</sup>

## 제 2 장 기액이상류 실험장치의 구축

### 2.1 기액이상류 실험장치의 구성

#### 2.1.1 실험장치의 개요

본 연구에서는 Fig. 5와 같은 실험 장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 저수 탱크에 저장된 청수는 흡입관, 전자유량계를 지나 펌프 내에 유입한다. 펌프 내에서 승압된 청수는 토출관, 유량조절밸브를 경유하여 다시 탱크내로 재순환된다. 저수탱크는 청수가 흡입되는 과정에서 자연스럽게 발생하는 공기를 제거하기 위해서 공기 분리판을 중앙에 설치하였다. 단단 밀폐형 원심펌프 소형(유량 :  $0.35\text{m}^3/\text{min}$ , 양정 : 15m), 대형(유량 :  $2.5\text{m}^3/\text{min}$ , 양정 : 18m)을 설치하여 두 펌프의 상사치를 비교할 수 있도록 하였다. KS 규격의 펌프실험장치에는 전자유량계를 토출측에 설치하도록 되어있으나<sup>[8]</sup> 이상류 상태에서는 공기의 유입으로 인하여 토출측에서 유량을 정확히 측정할 수 없으므로 토출유량을 정확히 측정하기 위해서 흡입측과 토출측에 각각 전자유량계를 설치하였다. Fig. 6은 실제 실험장치의 사진이다.

#### 2.1.2 임펠러와 케이싱

Fig. 7, 8은 소형원심펌프의 케이싱과 임펠러를 나타낸 것이다. 임펠러는 Fig. 8(a), (b), (c), (d), (e)와 같이 밀폐형과 반 개방형 두 가지 종류를 사용하였으며, 임펠러의 재질은 철(밀폐형:2kg, 반 개방형:1.4kg), 알루미늄(반 개방형:1.0kg), 아크릴(반 개방형:0.6kg)의 3종류를 사용하였다. 임펠러의 지름은 Fig. 8(f)와 같이

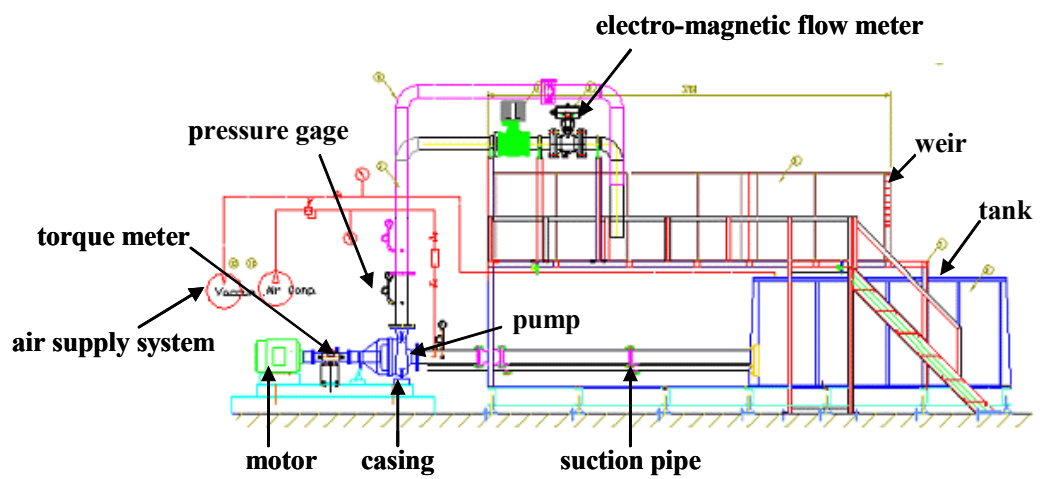


Fig. 5 Schematic view of air-water two phase flow experimental apparatus



Fig. 6 Picture of air-water two phase flow experimental apparatus



Fig. 7 Front view of the suction cover casing for visualization



(a) iron-closed



(b) aluminum and acrylic-closed



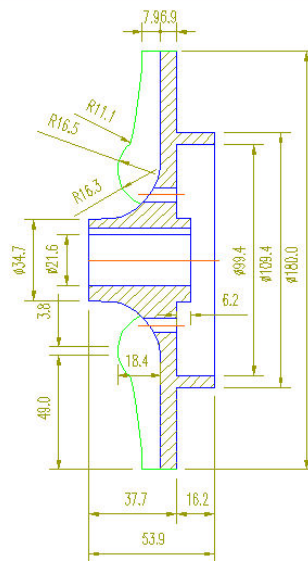
(c) iron-semi-open



(d) aluminum-semi-open



(e) acrylic-semi-open



(f) diagram of impeller

Fig. 8 Pictures of tested impeller



18cm, 폭은 0.8cm의 3차원 유선형이며, 날개의 갯 수는 5개이다. 케이싱과 임펠러는 유로와 임펠러 내부의 유동을 확인하고자 투명 아크릴을 이용하여 제작하였다. 케이싱은 원래 구입당시의 케이싱을 기준으로 하여 N/C가공하였다.

### 2.1.3 측정계

측정계는 Fig. 9에 도시한 바와 같다. 액상의 유량은 흡입관에 설치된 전자유량계에서 측정하였다. 펌프의 흡입압력과 토출압력은 압력측정공과 반도체 압력 변환기를 거쳐 전압치로 변환되어 앰프, A/D보드를 거쳐 컴퓨터에 기록된다. 펌프회전수는 치차와 전자 픽업의 조합에 의해 검출하였고, 축 토크 검출에는 토크검출기를 이용하였다. 또한, 측정치는 초당 100개의 데이터를 평균하여 산출하였다. 유량계수와 양정계수 및 축동력계수의 계산식은 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$\text{유량계수} : \phi = \frac{Q}{AU} \text{-----}(1)$$

$$\text{양정계수} : \psi = \frac{H}{U^2/2g} \text{-----}(2)$$

$$\text{축 동력계수} : \tau = \frac{L_s}{A\gamma U^3/2g} \text{-----}(3)$$

여기서, A는 임펠러의 단면적(m<sup>2</sup>), U는 원주 속도 (m/sec), Q는 유량(m<sup>3</sup>/min), g는 중력가속도(m/sec<sup>2</sup>),  $\gamma$ 은 비중량(kgf/m<sup>3</sup>),  $L_s$ 는 축 동력(W)을 의미한다.

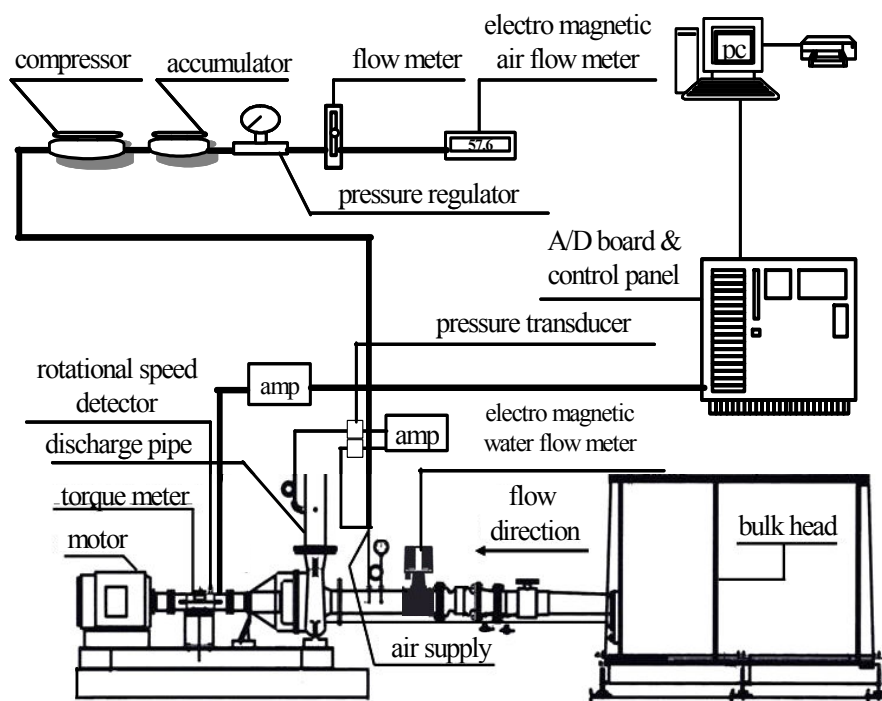


Fig. 9 Schematic illustration of pump characteristics measurement system

## 2.2 기액이상류 실험장치의 운전

### 2.2.1 실험장치의 기동

작동은 반드시 다음과 같은 순서에 준하여야 한다. 첫째, 펌프를 기동하기 전에 반드시 펌프를 손으로 회전시켜서 이상음이 나는지 펌프가 정상적으로 회전하는지를 확인한다. 둘째, 실험장치의 흡입측 밸브와 토출측 밸브가 완전히 open되어 있는지를 확인하고 실험실 주 배전반 전원을 on시킨다. 셋째, Fig. 10(a)에서 주 전원에 전원이 들어온 것을 확인한 후 Fig. 10(b)의 key s/w를 오른쪽으로 돌려서 전원을 공급하고, Fig. 10(c)의 컨트롤 패널의 start 버튼을 누른다. 넷째, Fig. 10(d)에서와 같이 large, small pump의 start 버튼을 누른 후 컴퓨터를 기동하여 LabVIEW program을 가동한다. 주파수는 0.00(0rpm)에서부터 60(1750rpm)까지 조절이 가능하다. 처음에는 stop에 맞추어져 있으므로 run 버튼을 클릭 하여 가동시킨다. 단 컴퓨터상에서 작동시킬 경우에는 run 버튼을 클릭해도 가동되지 않는다. 그러나 local상에서 작동시킬 경우에는 run 버튼을 클릭하면 가동되므로 작동시 주의한다. 다섯째, 운전 중 이상음이 나거나 배관에서 누설하면 펌프의 stop 버튼을 눌러 펌프를 정지시키고 필요한 조치를 취한다.

### 2.2.2 프로그램 조작방법

기액이상류 실험장치의 제어에는 LabVIEW 7.0 프로그램을 이용하였다. 프로그램의 목적은 기액이상류 실험장치를 제어하여야 할 모든 주변기기

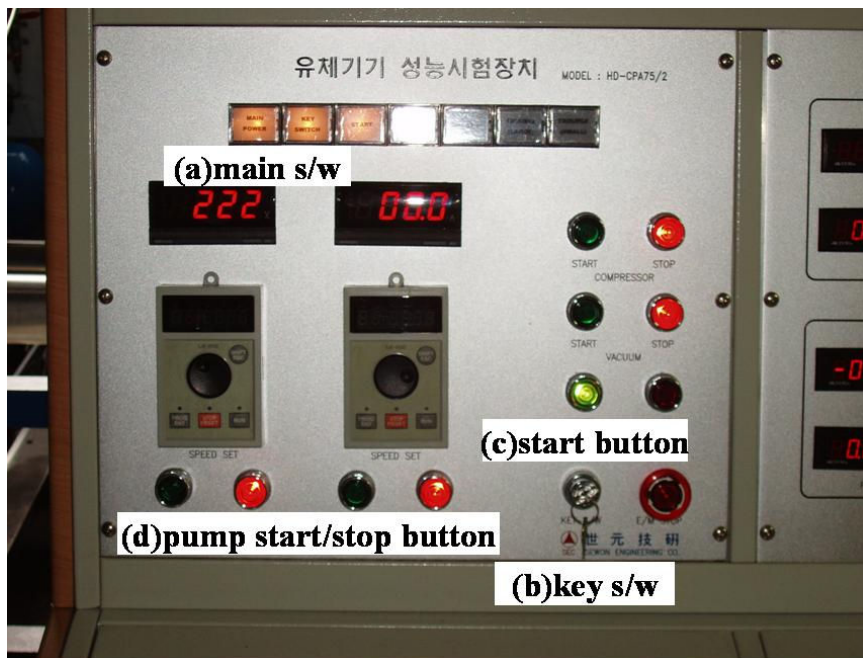


Fig. 10 Control panel of air-water two phase flow experimental apparatus

를 pc상에서 통합 제어할 수 있는 편리성을 제공하는데 있다. Large, small pump의 기동과 정지, rpm 조절 및 유량조절밸브의 개폐량을 조절할 수 있다. 흡입압력, 토출압력, 유량, 양정, 물의 온도, 토크, 보이드율, 회전속도, 효율, 축동력, 수동력 등의 데이터를 획득하여 실시간으로 나타내준다. Fig. 11은 LabVIEW를 처음 가동하였을 경우의 화면으로서 open 버튼을 눌러서 pump tester - 716을 더블 클릭하여 실행파일을 실행시킨다. Fig. 12는 프로그램의 초기화면으로서 edit 아래의 화살표를 클릭하여 아이디와 비밀번호를 입력하여 로그인 한다. 펌프의 기동은 현재 0%로 되어있고 rpm, 시작유량 및 끝 유량은 0.1%단위로 조절할 수 있으며 각종 데이터를 수동, 자동으로 저장할 수 있다. Fig. 12에서 조건을 클릭 했을 경우에는 펌프사양, 시험조건, 자료획득 조건의 3가지 메뉴 바가 나온다. 시험조건을 클릭 하였을 경우에는 시험조건이 어떻게 되는지를 한눈에 알아볼 수 있다. 자료획득 조건을 클릭하면 실험동안에 받은 데이터를 한눈에 쉽게 볼 수 있으며 테이블을 클릭하면 실험동안에 받은 데이터를 한눈에 쉽게 볼 수 있다. 그래프를 클릭하면, Fig. 13에서와 같이 실험동안의 데이터를 자동적으로 그래프화 시켜서 쉽게 볼 수 있다. 커브 피팅을 했을 경우에는 보다 부드러운 곡선의 그래프를 볼 수 있다.

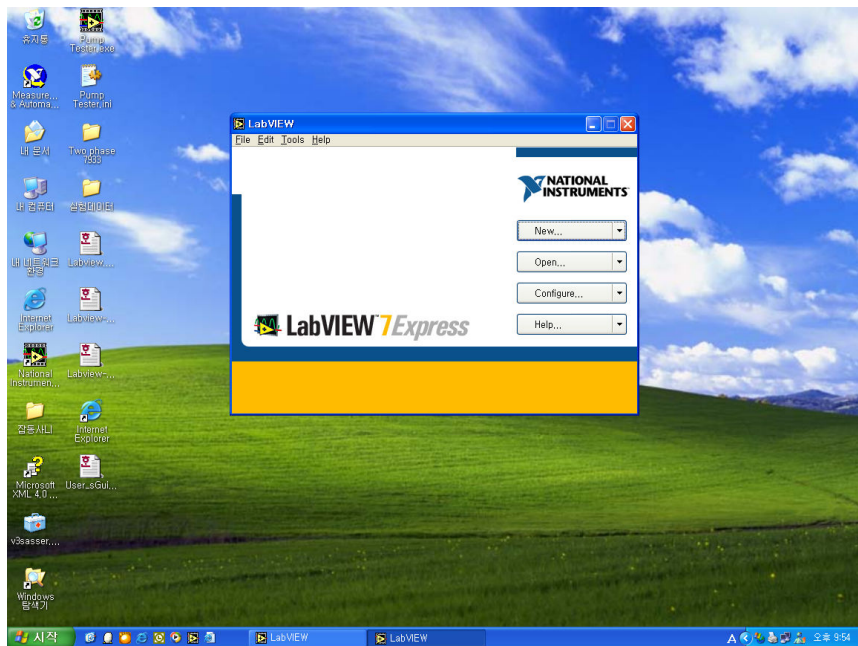


Fig. 11 Initial screen of LabVIEW

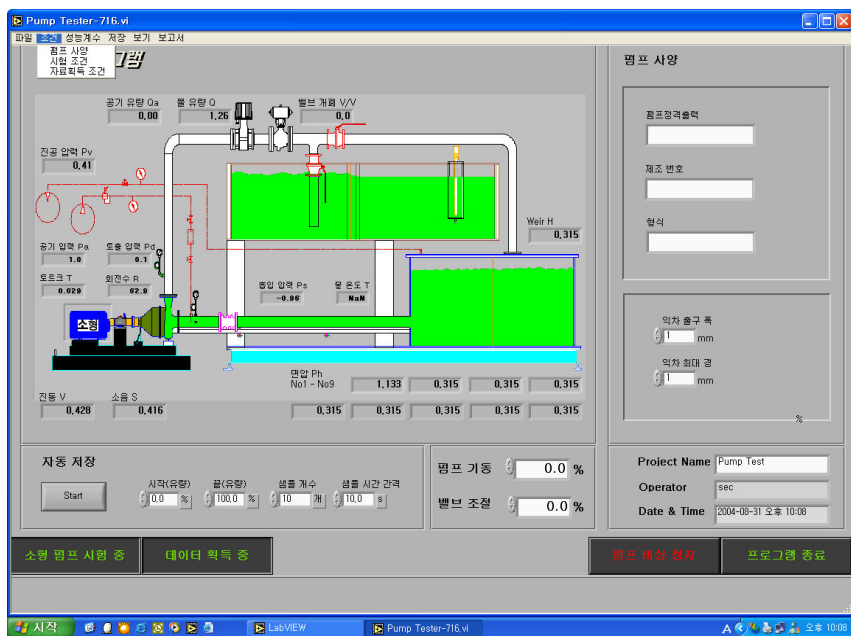


Fig. 12 Initial screen after starting LabVIEW

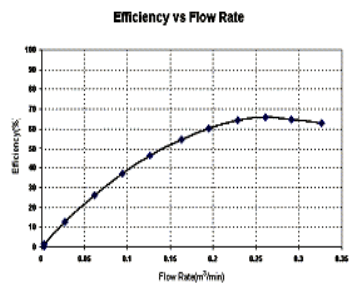
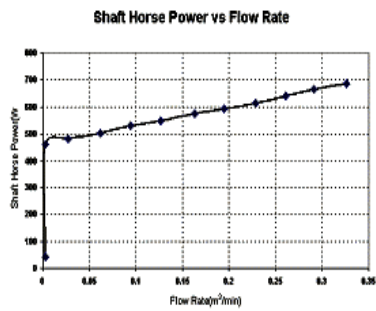
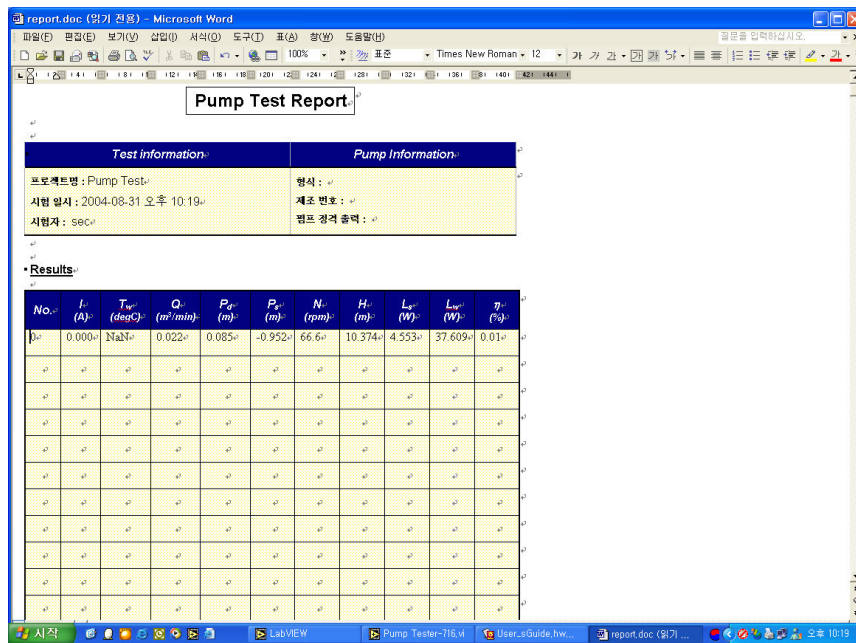


Fig. 13 Test report



## 제 3 장 기액이상류 실험장치의 신뢰성 검증

### 3.1 실험 펌프

실험용 펌프로 Fig. 14와 같이 축동력 1.5kW(유량 :  $0.35\text{m}^3/\text{min}$ , 양정 : 15m) 단단 밀폐형 원심펌프를 선택하였다. 케이싱과 임펠러는 내부의 유동을 확인하기 위해서 투명아크릴을 이용하여 N/C가공하였으며 밀폐형과 반 개방형 임펠러에 대하여 각각 제작 상 발생하는 철 임펠러와 투명아크릴 임펠러 사이의 질량 차이로 인한 영향을 알아보고자 알루미늄으로 된 임펠러를 제작하였다. 실험 펌프는 우선 케이싱의 제작이 올바르게 되었는지를 확인하기 위해서 구입당시의 철 케이싱과 철 밀폐형 임펠러, 아크릴 케이싱과 철 밀폐형 임펠러를 이용하였으며, 질량에 따른 성능의 차이를 확인하기 위해서 철, 알루미늄, 아크릴 3가지 종류의 재질로 제작한 반 개방형 임펠러를 사용하였다. 또한, 임펠러 형상에 따른 성능의 차이를 확인하기위해서 아크릴 케이싱을 대상으로 밀폐형과 반 개방형 임펠러를 이용하였다.

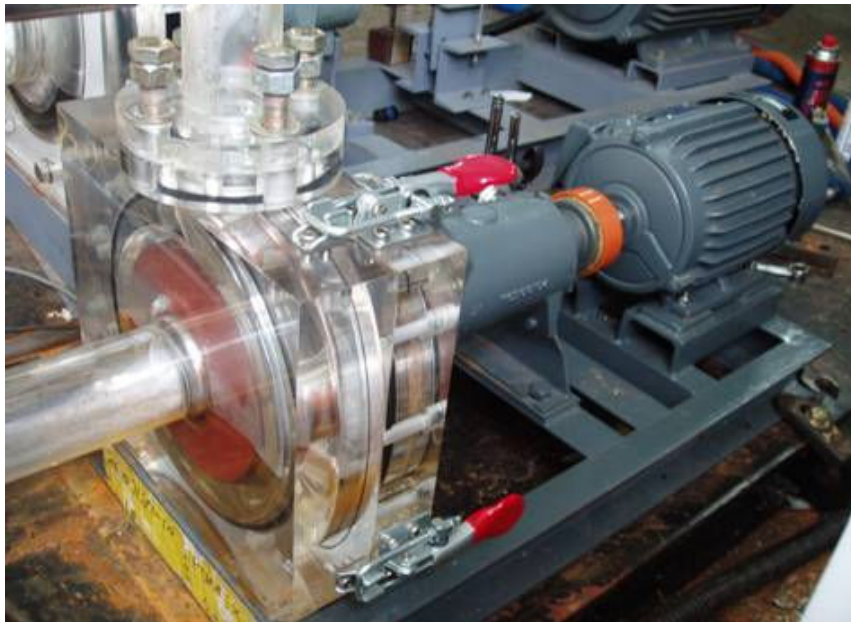


Fig. 14 Test pump

## 3.2 유량계 검증

### 3.2.1 직각 3각 위어로 측정하는 방법

위어는 위어판, 지지판 및 수로로 구성된다. 유량 계산은 다음과 같이 한다.<sup>[9]</sup>

$$\text{3각 위어} : Q = Kh^{\frac{5}{2}}$$

여기에서 Q : 유량( $m^3/min$ )

h : 위어의 양정(m)

K : 유량 계수

$$= 81.2 + \frac{0.24}{h} + \left(8.4 + \frac{12}{\sqrt{D}}\right) \left(\frac{h}{B} - 0.09\right)^2$$

B : 수로의 폭(m)

D : 수로 바닥면에서 노치점까지의 높이(m)

이 계산식의 적용 범위는 다음과 같다.

$$B=0.5-1.2m$$

$$D=0.1-0.75m$$

$$H=0.07-0.26m(\text{또는, } h=B/3 \text{ 이하})$$

### 3.2.2 전자 유량계의 원리

전자유량계는 페러데이의 전자유도 법칙을 이용한 방식으로 Fig. 15와 같이 비전도성 물질인 stainless steel tube를 내장하고 있다. Tube의 외면에는 2개의 DC전원의 전자기식 코일이 각각 배관을 중심으로 서로 마주보도록 설치되어 있으며, 이러한 코일에 수직으로 2개의 전극이 튜브 안쪽으로 위치하여 있다. 코일에 전원이 가해지면, 관경을 따라 마그네틱 자장이 형성되고, 이때 자장이 형성된 배관을 전도도를 가진 유체가 통과하게 되면, 전극을 통하여 전압이 유도된다. 이러한 전압은 유체의 평균 유량속도 값에 직접적으로 비례하는 값으로 나타나게 되며, 이를 2개의 전극을 통하여 측정한다. 이 유도된 전압은 변환기 디지털 방식의 증폭과정과 가공과정을 거쳐 정밀한 아날로그 또는 디지털 신호를 발생하게 된다. 이 신호는 유량값, 적산값을 표시할 뿐만 아니라, 검출기와 변환기의 분리형인 경우에도 사용이 가능하다.<sup>[10]</sup>

본 실험에서 사용한 전자 유량계는 Fig. 16의 FM-100MG series로서 사양은 Table-1과 같다.

### 3.2.3 직각 3각 위어실험과 전자유량계 실험결과의 비교

유량 측정방법 중 직각 3각 위어와 전자유량계를 실험장치에 설치하여 직각 3각 위어의 유량과 전자유량계의 유량을 측정하여 전자유량계의 정확도를 비교하였다. Fig. 17은 전자유량계와 직각 3각 위어의 측정 데이터를 비교한 그래프이다. 유량이  $0.132\text{m}^3/\text{min}$ 를 기준으로 이보다 더 적은 유량에서는 위어와 전자유량계의 측정값은 거의 차이가 없었지만, 유량

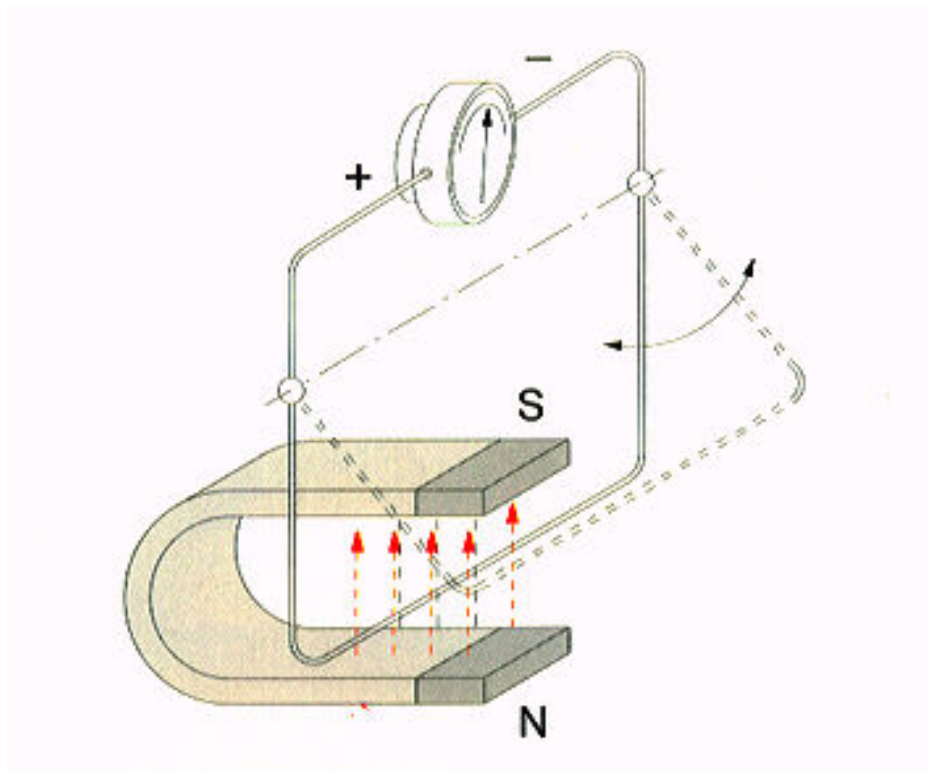


Fig. 15 Principle of electro-magnetic flow meter



Fig. 16 Picture of electro-magnetic flow meter(FM-100MG series)

Table-1 Technical data of electro-magnetic flow meter(FM-100MG series)

Main Part		Technical Specification
METER SIZE		일체형 DN20-DN300 (3/4"-12") (OPTION : 분리형)
FLANGE		KS 10K (OPTION : ANSI, DN 등)
측정 대상		상수, 하수, 폐수 및 지하수 등 전기전도도 5 $\mu$ S/cm 이상인 모든 유체
측정 방식		Pulse DC field 방식의 전자기 측정 방식
측정 유속 범위		0.1 m/s ~ 10m/s (turndown ratio 100:1)
오차 범위		$\pm 5\%$ of SPAN (OPTION : $\pm 0.25\%$ of SPAN)
동작 온도		-20도 ~ +80도
DISPLAY		20CHAR×2LINE TEXT LCD with LED backlit
		순간유량, 순간유속, 적산유량, 적산시간
재질	라이닝	HARD RUBBER, CERAMIC
	전극	SUS316, Hastelloy C4, 백금, 티타늄
	본체	SUS316, SUS304, STEEL 및 알루미늄 다이캐스팅
출력 신호	CURRENT	4-20mA
	PULSE	DC 15V Pulse or Open Collector
	STATUS	Low/HI LIMIT (OPTION)
	DIGITAL	RS-232 (OPTION)
전원	공급전원	110/220V AC, 60Hz (OPTION : 220/240V AC, 50Hz)
	소비전력	21VA
보호등급		IP65 또는 NEMA 4 and 4X

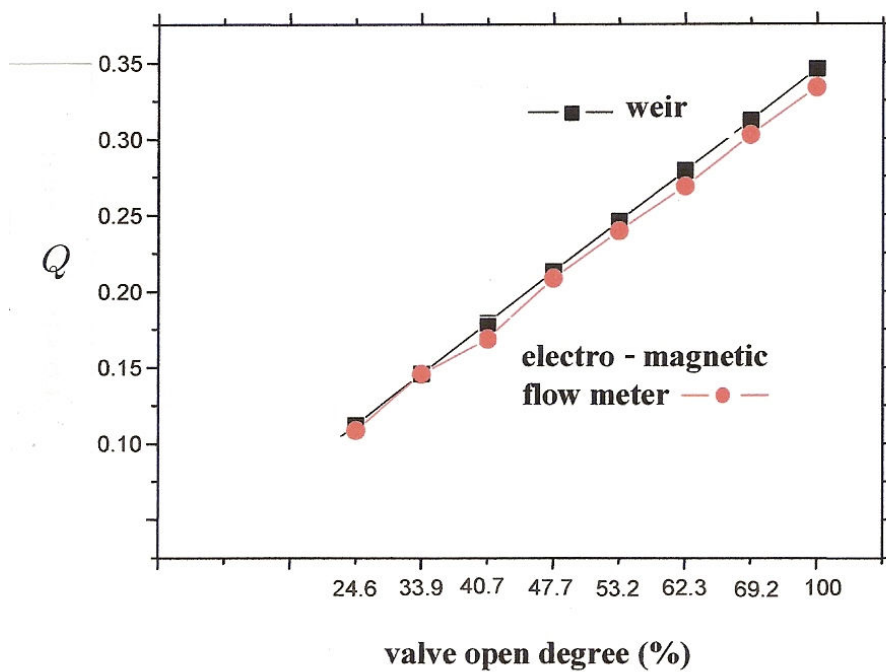


Fig. 17 Graph of compare electro-magnetic flow meter with weir



이 증가할수록 위어와 전자유량계의 오차는 커지며, 최대유량에서 위어의 유량은  $0.3375\text{m}^3/\text{min}$ 이며, 전자유량계의 유량은  $0.33125\text{m}^3/\text{min}$ 으로서 전자유량계와 직각 3각 위어는 98.15%의 정확도를 만족하였다. Table-1의 사양에서는 오차범위가  $\pm 0.5\%$ 이내였지만, 실제로 실험한 결과 1.85%의 다소 큰 오차를 보였다. 이것은 실험장치의 구조상 배관의 굴곡과 배관의 재질에 의한 마찰 및 유체의 온도에 의한 밀도차 등에 의한 것으로 생각된다.

### 3.3 성능실험결과의 재현성 및 신뢰성 검증

Fig. 18은 아크릴 케이싱과 알루미늄 임펠러에 아크릴 덮개의 밀폐형 임펠러를 사용하여 4일 동안 물의온도, 흡입양정 등 동일한 조건에서 4번의 실험을 한 것이다. 그 결과 값이 동일하여 재현성을 확인할 수 있었다.

Fig. 19는 구입한 철 케이싱과 철 밀폐형 임펠러와 제작한 아크릴 케이싱과 구입한 철 밀폐형 임펠러를 이용하여 실험한 결과를 실 유량을 기준으로 양정과 축동력 및 효율 데이터를 나타낸 것이다. 아크릴 케이싱과 철 케이싱은 최고양정이 14.99m 와 14.57m, 최고효율은 유량이 0.262m<sup>3</sup>/min에서 67.24%, 0.257m<sup>3</sup>/min에서 66.34%이다. 최고양정, 최고효율, 유량의 평균 오차는 2.06%였다. 아크릴 케이싱과 철 케이싱의 재질 차이와 N/C 가공의 오차를 고려할 때 평균 2.06%의 오차는 충분히 신뢰성을 만족한다고 볼 수 있다. 또한 실험에서 사용한 케이싱의 재질이 펌프의 특성에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있었다.

Table-2에서 비교한 것과 같이 메이커에서 제시한 성능과 잘 일치함을 알 수 있어 기액이상류 실험장치가 신뢰성을 만족함을 알 수 있었다.

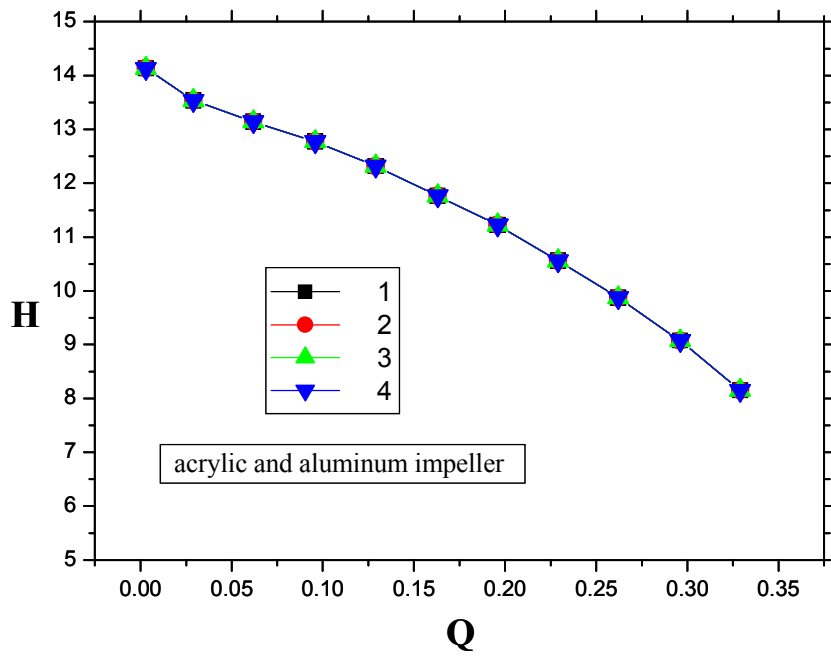


Fig. 18 Reappearance of single-stage centrifugal pump in single-phase flow

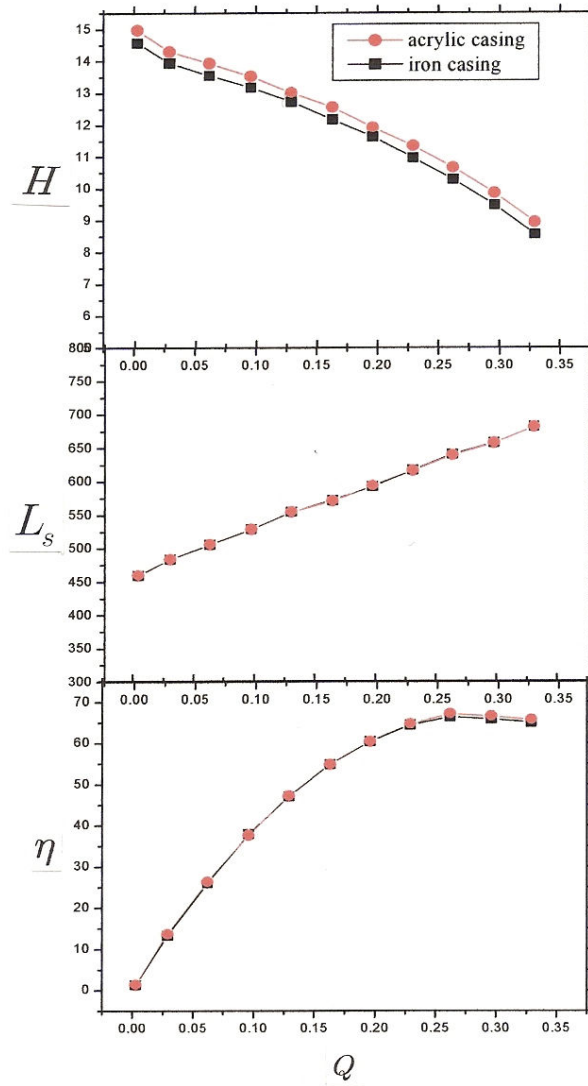


Fig. 19 Performance of single stage centrifugal pump in single-phase flow

Table 2. Compare experiment value with company value

메이커에서 제시한 값		실험치		오차
양정	15m	양정	14.99m (아크릴 케이싱)	0.07%
			14.57m (철 케이싱)	2.87%
효율	70%	효율	67.24% (아크릴 케이싱)	3.94%
			66.34% (철 케이싱)	5.23%

## 제 4 장 단상류시의 원심펌프 특성

### 4.1 임펠러 질량의 변화에 따른 특성

Fig. 20은 반 개방형 철(1.4kg), 알루미늄(1kg), 아크릴(0.6kg) 임펠러의 질량에 따른 단단 원심펌프의 성능실험 결과를 나타낸 그래프이다. 축동력은 질량에 비례하여 증가한다. 양정은 저 유량에서는 질량에 따라 차이가 있지만, 최고 효율점 직전을 시작으로 유량이 증가할수록 거의 같아짐을 알 수 있었다. Fig. 21과 같이 무차원화한 특성곡선을 비교해보면 거의 변화가 없어 임펠러 질량이 펌프 특성에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있었다.

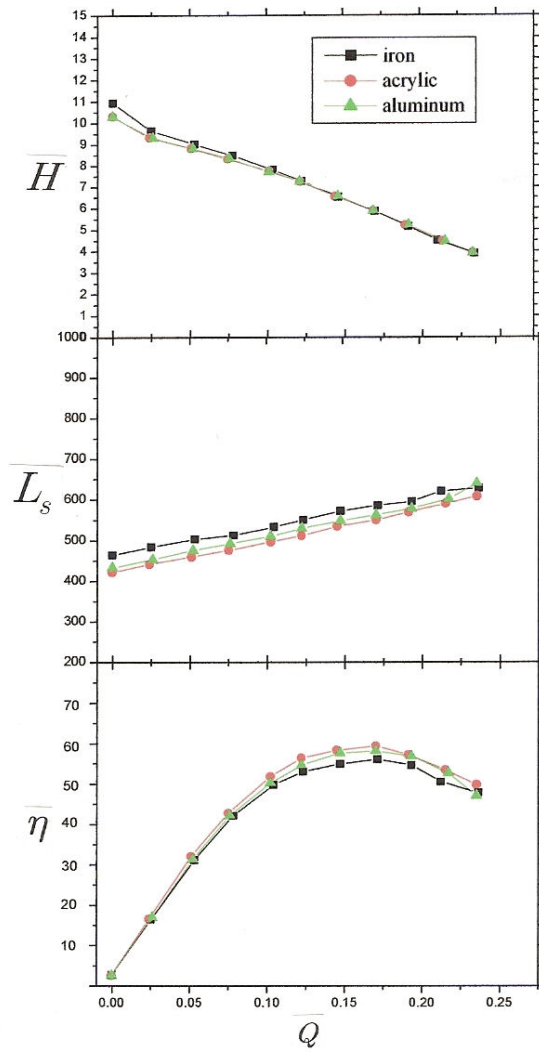


Fig. 20 Performance of single-stage semi open-type centrifugal pump in single-phase flow according to mass of impeller

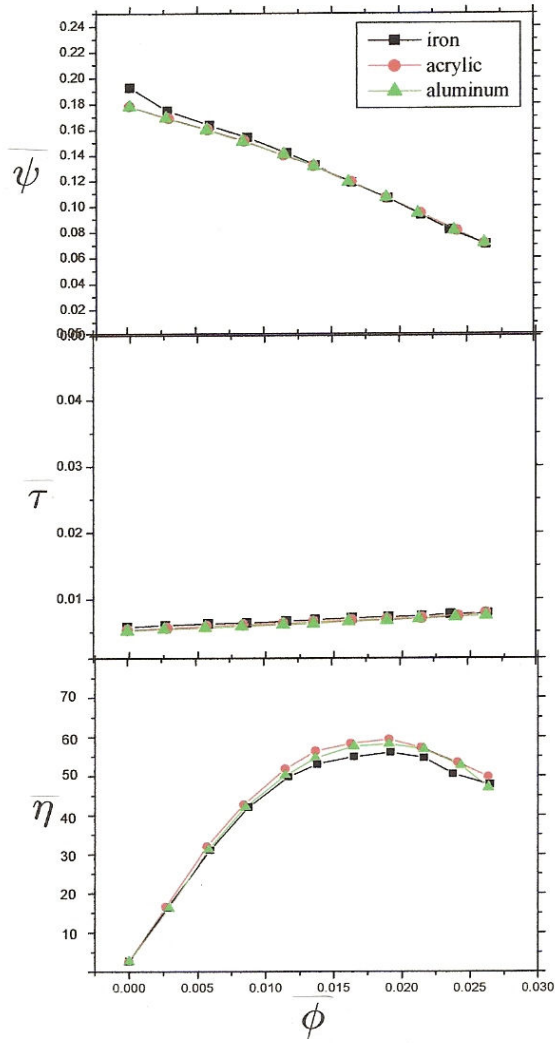


Fig. 21 Characteristics of single-stage semi open-type centrifugal pump in single-phase flow according to mass of impeller



## 4.2 임펠러 형상에 따른 특성

Fig. 22는 임펠러 형상에 따른 단단 원심펌프의 성능실험 결과를 나타낸 그래프이다. 본 실험에서 사용한 밀폐형 임펠러는 최고효율이 67.24%일 때 유량계수는 0.030이며, 반 개방형 임펠러는 최고효율이 60.08%일 때 유량계수는 0.0225이다. 축동력은 거의 변화가 없었으나 양정계수는 누설손실 등의 영향으로 유량이 증가할수록 평균 0.063 정도 차이가 있었으며, 그 차이는 유량이 증가할수록 더욱 증가하였다. 이러한 손실은 추후 속도계측, 압력계측 등의 실험을 추가하여 정량화 하고자 한다. 본 실험에 사용한 임펠러의 경우 최고효율은 7.16%가 더 높고, 유량계수는 0.0075가 많음을 알 수 있다.

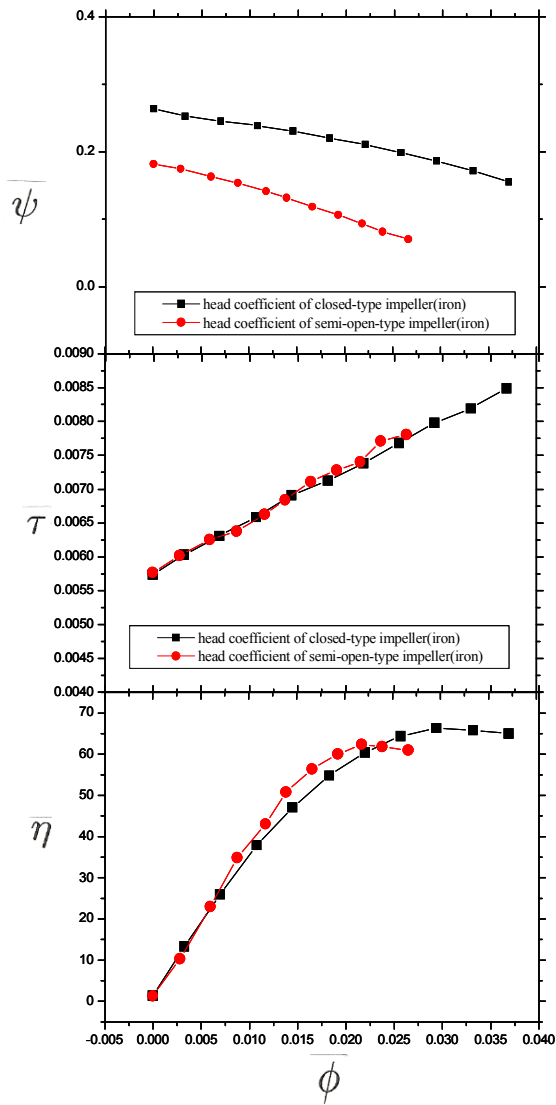
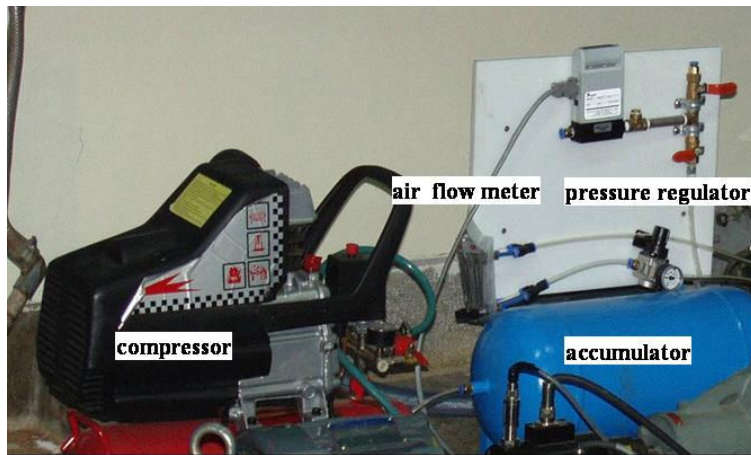


Fig. 22 Characteristics of single-stage centrifugal pump in single-phase flow according to shape of impeller

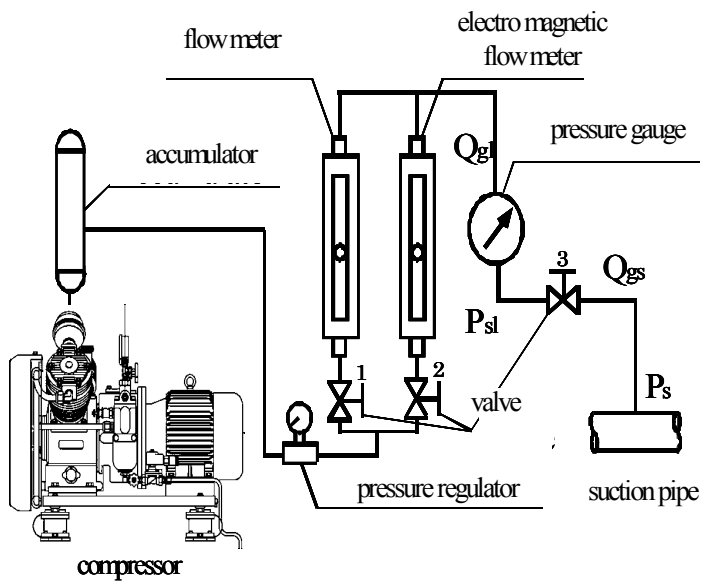
## 제 5 장 기액이상류시의 원심펌프의 특성

### 5.1 공기공급장치의 구성

Fig. 23은 이상류 실험시 공기공급장치 및 공기의 양과 압력을 조절하는 장치이다. 공기공급 장치는 압축기, 공기저장탱크, 압력조절기, 2개의 아날로그 공기유량계와 1개의 디지털공기유량계, 압력계로 구성되어있다. 공기압축기에서 공기를 생성하고 생성한 공기는 안정적인 공급을 위하여 공기저장탱크에 저장된다. 유량계의 범위는 각각  $10\ell/min$ ,  $1\ell/min$ 이며, 이것은 좀더 정확한 공기량을 조절하기 위해서 범위가 다른 것을 하나씩 설치하였다. 공기를 공급하는 위치는 케이싱에서 200mm 상류측 흡입관에 설치하였다. 또한 공기를 투입하는 압력은 압력조절기를 이용하여 흡입압력과 비슷한 압력을 유지하였다.



(a) picture of air supply system



(b) schematic illustration of air supply system

Fig. 23 Air supply system

## 5.2 임펠러 형상에 따른 기액이상류 특성

Fig. 24, 25는 기액이상류시 임펠러 형상에 따른 단단 원심펌프의 성능 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 먼저 단상류시의 성능을 측정하고, 유량 계수를 등 간격으로 10등분하여 각각의 유량계수에서 공기를  $1\ell/min$ 씩 증가시키면서 측정한 결과를 세로점선으로 나타내었으며, 각각의 유량계수에서 보이드율이 같은 지점을 가로실선으로 연결하였다. 임펠러 형상에 따라 우선 밀폐형 임펠러에서 보이드율이 6%를 초과했을 시 폐쇄가 일어난 반면 반 개방형은 4%를 초과했을 시 폐쇄가 일어났다. 그러나 Fig. 26에서와 같이 밀폐형 임펠러는 반개방형에 비해 초기 보이드율(3%)이 증가할 경우에는 효율의 감소율이 1.6%로 매우 적지만, 반 개방형 임펠러는 7.6%로 밀폐형 보다 감소율이 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나 보이드율이 증가할수록 반 개방형 임펠러의 감소율은 밀폐형 임펠러의 감소율보다 작아진다는 것을 알 수 있었다. 또한, Fig. 27에서와 같이 양정 역시 반 개방형이 보이드율이 3% 이상에서는 그 감소율이 밀폐형에 비하여 적은 것을 알 수 있었다. 본 실험에서 사용한 펌프가 적은 유량이어서 반 개방형의 임펠러의 폐쇄가 4%에서 이루어졌지만, 위 실험결과로 미루어 볼 때 보다 큰 유량을 가지는 펌프에서는 보이드율이 증가할수록 반 개방형 임펠러가 밀폐형 임펠러에 비하여 효율이 더 좋아진다는 것을 생각할 수 있었다.

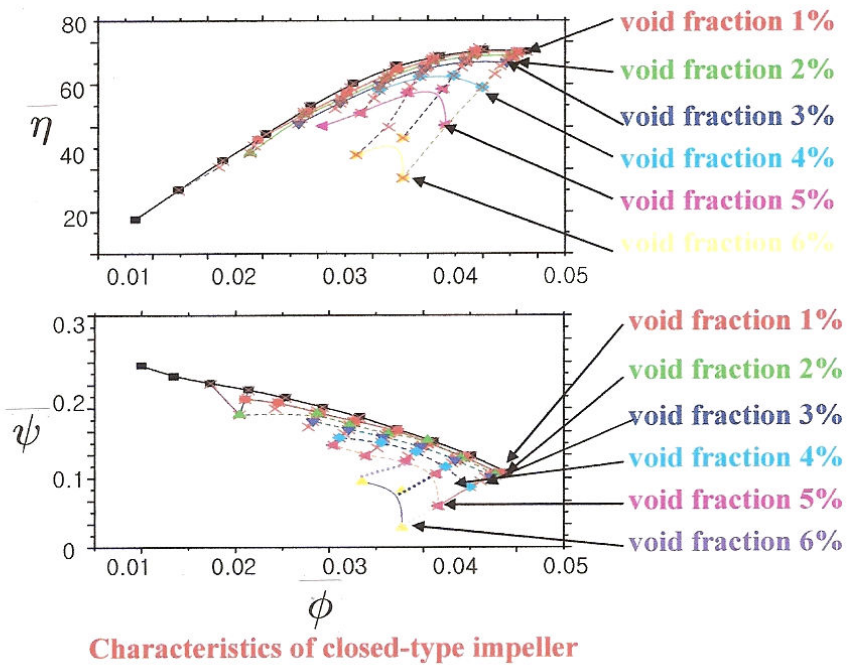
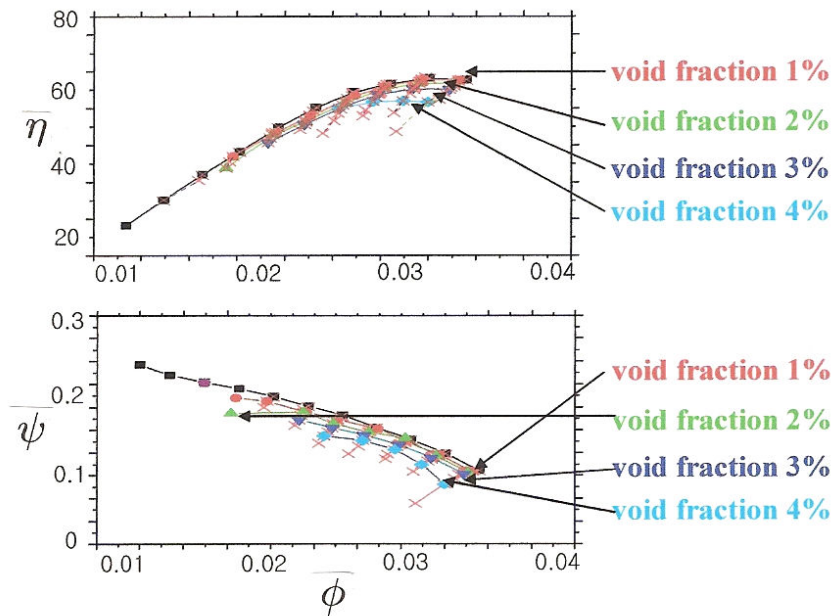


Fig. 24 Characteristics of single-stage closed-type centrifugal pump in air-water two-phase flow according to void fraction



**characteristics of semi-open-type impeller**

Fig. 25 Characteristics of single-stage semi-open-type centrifugal pump in air-water two-phase flow according to void fraction

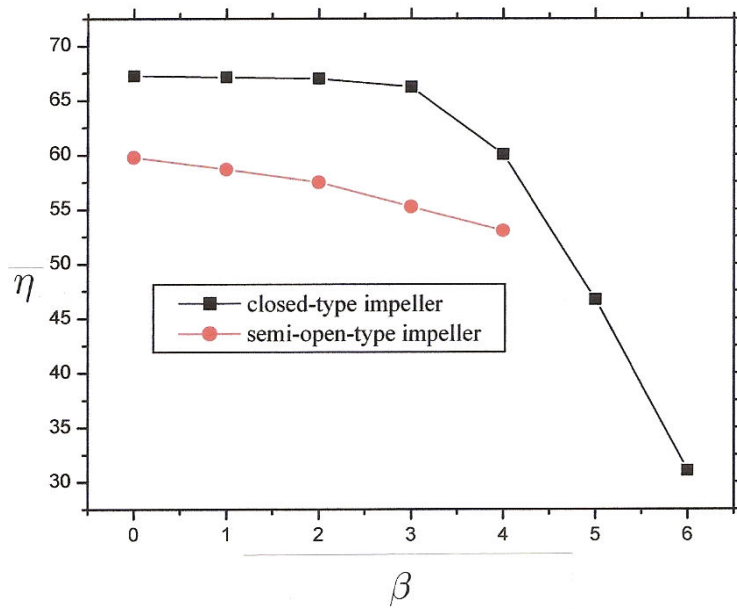


Fig. 26 Characteristics of single-stage closed-type and semi-open-type impeller according to void fraction



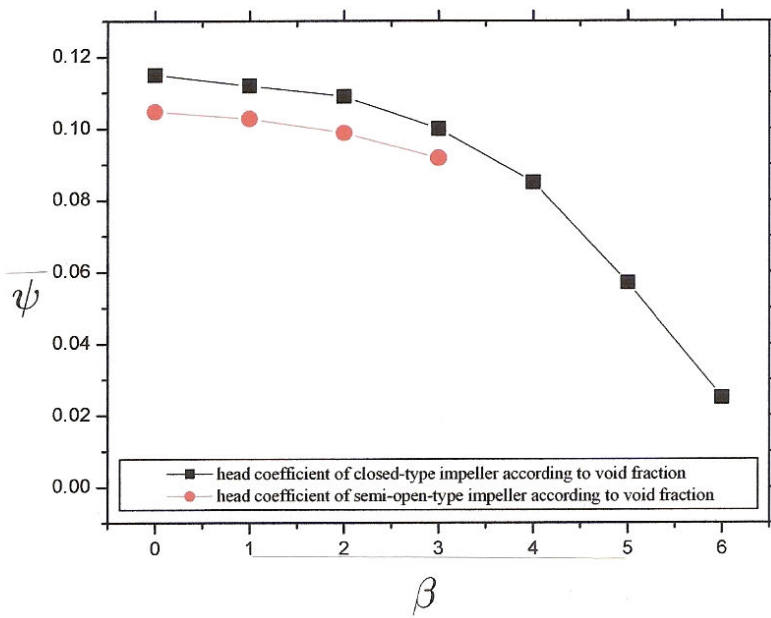


Fig. 27 Characteristics of single-stage closed-type and semi-open-type impeller according to void fraction

## 5.3 기액이상류시의 유동패턴

### 5.3.1 가시화 실험장치의 구성 및 실험방법

Fig. 28은 기액이상류시 펌프내부의 유동패턴의 실험장치 사진이다. 공기의 공급을  $1\ell/min$ 씩 증가시켜서 유로폐쇄시 1대의 sheet light와 디지털 캠코더를 이용하여 촬영하였다.

### 5.3.2 유로폐쇄시의 유동특성

Fig. 29의 (a)~(f)는 기액이상류시 보이드율이 1%에서 6%까지 증가하는 동안의 유동패턴을 나타낸 사진이다. Fig. 30은 보이드율이 6%초과시 폐쇄가 일어났을 경우의 유동패턴을 나타낸 사진이다. 보이드율이 증가할수록 공기방울이 유로의 전 영역으로 확대되었으며, 임펠러 입구로의 재순환이 증가하였다. 기액이상류시 유로가 폐쇄되었을 경우에는 케이싱 토출측에서는 유체의 흐름이 강한 소용돌이와 함께 토출을 하지 못하고 임펠러 흡입부분으로 강하게 재순환되었다.

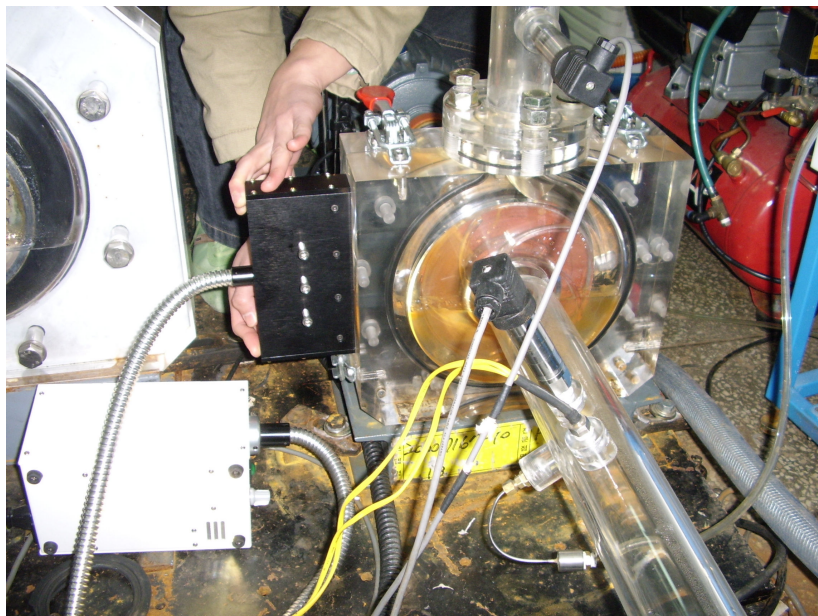
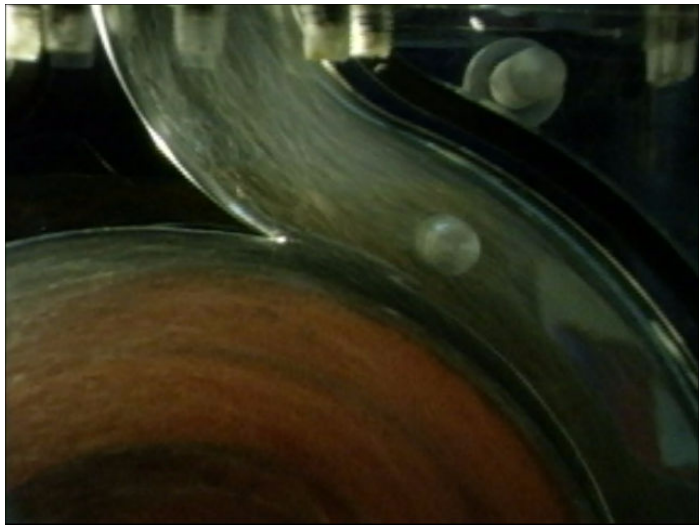
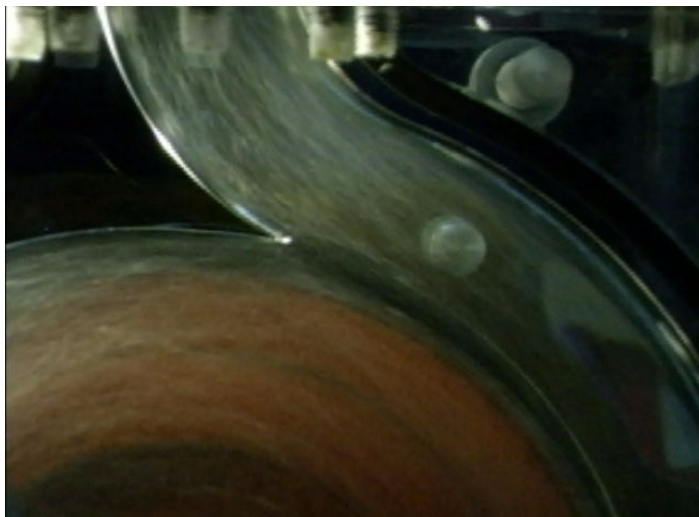


Fig. 28 Picture of visualization experimental apparatus

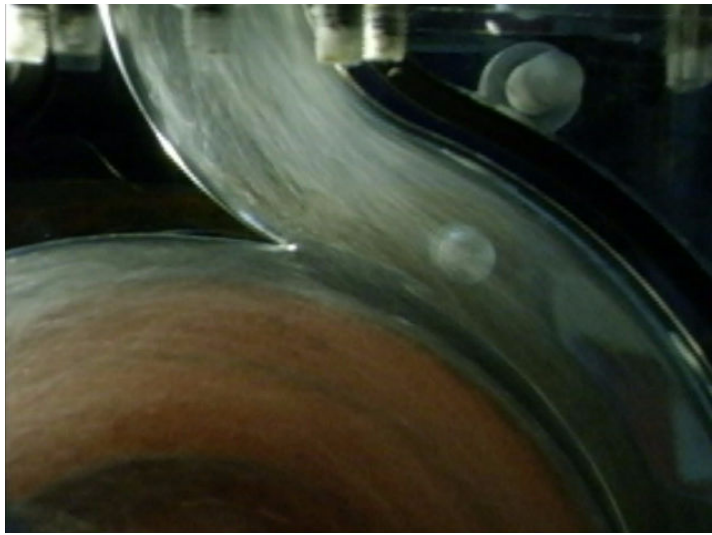


(a) void fraction - 1%

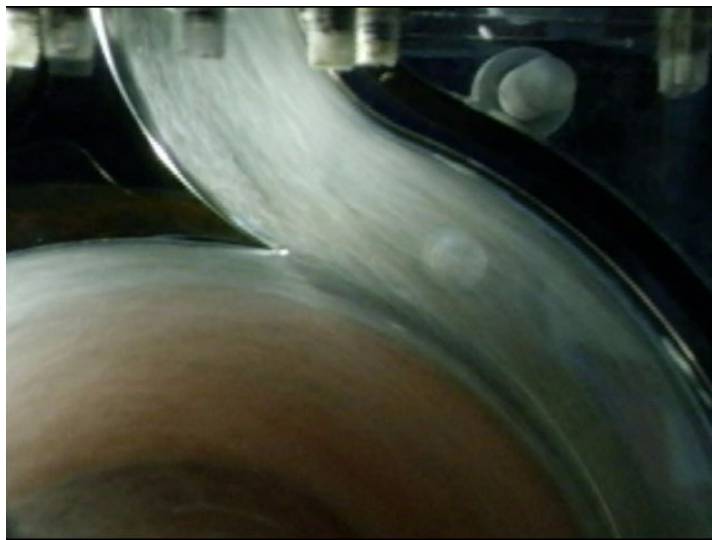


(b) void fraction - 2%

Fig. 29 Pictures of void fraction 1% and 2%

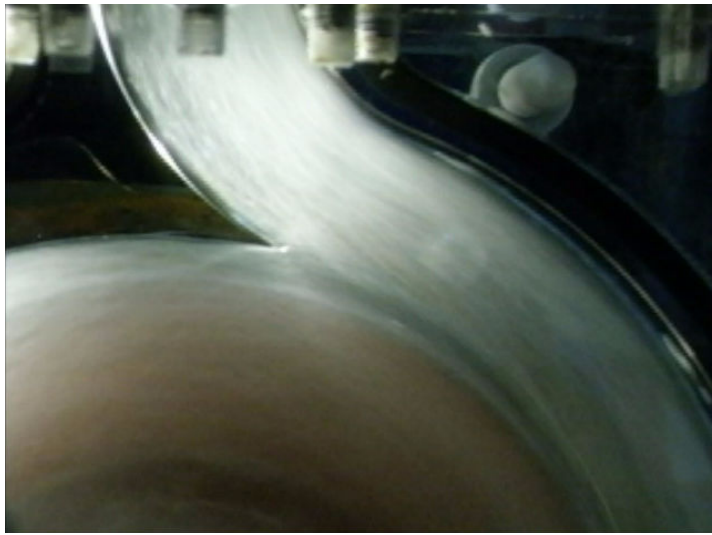


(c) void fraction - 3%



(d) void fraction - 4%

Fig. 29 Pictures of void fraction 3% and 4%



(e) void fraction - 5%



(f) void fraction - 6%

Fig. 29 Pictures of void fraction 5% and 6%



Fig. 30 Pictures of break down

## 제 6 장 결론

기액이상류 실험장치를 구축하여 실험장비의 신뢰성을 검증하고, 펌프의 성능이 저하되는 손실부분을 정량화하기 위한 기초 자료를 확보하고자 임펠러 형상 및 질량을 변수로 단상류시의 펌프의 특성을 파악하였으며, 이상류시 보이드율을 변수로 펌프의 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 알 수 있었다.

(1) 기액이상류시 펌프의 특성 실험장치를 구축하고 유량계와 실험장치가 신뢰성 및 재현성을 만족함을 확인하였다.

(2) 임펠러 질량이 양정계수와 축동력계수에 미치는 영향은 거의 없다.

(3) 밀폐형 임펠러와 반 개방형 임펠러의 경우 축동력은 거의 변화가 없으나 양정계수는 평균 0.063정도 차이가 있으며, 그 차이는 유량이 증가할수록 증가한다.

(4) 단상류시는 밀폐형 임펠러가 반 개방형 임펠러에 비해서 양정 및 효율은 우수하지만, 기액이상류시에는 반 개방형 임펠러가 보이드율의 증가에 따른 양정 및 효율의 감소율은 줄어든다.



## 참고문헌

- [1] Minemura, K., and Murakami, M., 1988, "Developments in the Research of Air-Water Two-Phase Flows in Turbomachinery", JSME International Journal, Series II, Vol. 31, pp. 615-662.
- [2] Kaneko, M., and Ohashi, H., 1981, "Self-Excited Oscillation of a Centrifugal Pump System under Air/Water Two-Phase Flow Condition," Proceedings of the 11th Symposium of IAHR, pp. 36. 1-36. 14.
- [3] Furukawa, A., Kuwano, T., and Okuma, K., JSME ICFE-97-811 (1997), pp. 479-484.
- [4] You-Taek KIM, Kazuhiro Tanaka, Yoichiro Matsumoto, "Tip Clearance and Bubble Size of a Screw-type Centrifugal Pump Operating in Two-phase Flow", PROCEEDINGS of The Third ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference」, pp.1-8, 미국기계학회(ASME), 일본기계학회(JSME), 1999
- [5] You-Taek KIM, Kazuhiro Tanaka, Yoichiro Matsumoto, Young-Ho LEE, "Flow Pattern and Pressure Distribution due to Air Entrainment in a Screw-type Centrifugal Pump", PROCEEDINGS of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting 2000」, pp.1-7, 미국기계학회(ASME), 2000
- [6] You-Taek KIM, Kazuhiro TANAKA, and Young-Ho LEE, Characteristics of a Small Screw-type Centrifugal Pump Operating in Air-Water Two-Phase Flow, Journal of Fluid Machinery(in Korean), Vol.2-4(1999), pp. 9-15.
- [7] Kim, J.H., Duffey R.B., and Belloni P., 1985, "On Centrifugal pump Head Degradation in Two-Phase Flow," Design Methods for Two-Phase Flow in Turbomachinery, The ASCE/ASME Mechanics Conference Albuquerque New Mexico, pp. 9-15.

[8] KS B 6301, 2001, 원심펌프, 사류펌프 및 축류펌프의 시험 및 검사방법, 한국표준협회.

[9] KS B 6032, 2001, 펌프 토출량 측정방법, 한국표준협회.

[10] (주) 세창인스트루먼트, 전자유량계 매뉴얼

## Abstract

In a general centrifugal pump, if it is operated for a two-phase flow the activity of the impeller usually degrades and occasionally losses its function. However, the effect of break down of centrifugal pump due to entrained air has not been clarified yet. Thus, air-water two-phase flow experimental apparatus was installed to acquire basic data. This paper tries to analyze the single-phase flow and air-water two-phase flow characteristics through this air-water two-phase flow experimental apparatus. The pump rpm and the shaft torque are measured by rpm sensor and torque sensor. The casing is made up with transparency acrylic for confirmation the flow patterns. According to void fraction, mass and shape of impeller, the pump characteristics under a single-phase flow were measured. The test pump's maximum rpm, head, kW are 1,750, 15m and 1.5kW, respectively. The performance results of a single-stage closed-type centrifugal pump satisfied reappearance and reliance. Also, in a single-phase flow, compare to semi-open type impeller, closed-type impeller has superior and efficiency. But in air-water two-phase flow, the rate of decrease of efficiency and head decreases.

## Nomenclature

$A$  : 임펠러 출구의 단면적 ( $cm^2$ )

$H$  : 펌프의 양정 (m)

$L_s$  : 수동력 (W)

$Q$  : 유량 ( $m^3/min$ )

$U$  : 원주속도 (m/sec)

$\beta$  : 보이드율 (%)

$\beta_{\max}$  : 최고 보이드율 (%)

$\gamma$  : 비중량 ( $g/cm^3$ )

$\eta$  : 펌프의 효율 (%)

$\tau$  : 축동력계수

$\phi$  : 유량계수

$\psi$  : 양정계수

## 감사의 글

석사과정 2년 동안 넘치는 사랑과 관심으로 지도를 해주신 김유택 지도교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 또한 학문적인 깊이를 더해주고 조언과 배려를 아끼지 않으신 남청도 교수님과 바쁘신 와중에도 학위논문을 심사하셔서 부족한 논문을 다듬어 주신 이영호 교수님께 고개 숙여 감사를 드립니다.

저는 대학원이란 곳에서 새로운 학문과 지식을 배웠으며, 많은 지인들을 만나 세상을 바라보는 눈 역시 조금은 넓힌 것 같습니다. 매사에 사람이 자신감을 잃으면 동산도 태산처럼 보이고, 해낼 수 있다는 자신감을 가지면 태산도 동산처럼 보인다고 했습니다. 처음 석사과정을 시작했을 때 저에게는 동산도 태산처럼 보였지만, 지금은 동산은 동산으로 태산은 태산으로 보는 정도의 자신감을 얻은 것 같습니다. 이러한 자신감을 가지도록 처음부터 끝까지 묵묵히 옆에서 도와준 김정환, 김범석 박사님께 감사드리고, 나와 함께 실험하며 밤새워 고생했던 기평이와 성일이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 힘들어 포기하고 싶을 때, 옆에서 항상 용기를 주신 이상일 기관장님과 김 영형, 실험기자재를 많이 빌려주고 실험방법에 대해서 조언해준 영규형과 성우에게도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 끝으로 실험장비에 대해서 처음부터 끝까지 많은 도움을 주신 세원사장님께 고개 숙여 감사의 말씀을 드립니다. 모든분들의 앞날에 영광이 있기를 기원합니다. 이렇게 많은 분들의 도움이 있었기에 석사학위를 무사히 마칠 수 있었던 것 같습니다.

지금 이 시간에도 못난 자식을 위해 일하고 계시는 아버지와 아직도 저녁이면 가스 스위치 차단했냐고, 차 조심하라고 전화하시며 걱정하시는 어머니..... 지금까지 한번도 말씀드리지 못했습니다. ‘아버지, 어머니 감사합니다. 그리고 사랑합니다.’ 자형과 누나들 그리고 사랑하는 조카 ‘재혁’이, ‘현진’이, ‘현서’에게도

고마움을 표현합니다. 세상에서 가장 사랑하는 한 사람에게도 고맙다는 말을 전합니다.

무엇보다 지금 이 순간에 감사의 글을 적을 수 있는 기회를 주신 김유탉 교수님께 다시 한번 감사의 말씀을 드리면서 이 글을 마무리 하고자 합니다.

**2006년 1월 4일 유동에너지 연구실에서**